

УДК 621.165.62-192

**О.Ю. ЧЕРНОУСЕНКО**, д-р техн. наук; проф. Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт»

### **ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ КОРПУСОВ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ К-800-240 СЛАВЯНСКОЙ ТЭС**

Предложена оценка повреждения и остаточного ресурса высокотемпературных элементов (корпусов высокого и среднего давления) паровых турбин большой мощности с определением повреждаемости с учетом ремонтных возобновляемых изменений конструкции паровой турбины в период эксплуатации и экспериментальных исследований свойств металла после 220 тыс. часов эксплуатации. Приведены расчетные и экспериментальные данные продленной прочности металла корпусов высокого и среднего давления и остаточные сроки эксплуатации паровой турбины К-800-240 энергоблока № 7, что работали в разных эксплуатационных условиях.

Запропоновано оцінку пошкодження та залишкового ресурсу високотемпературних елементів (корпусів високого та середнього тиску) парових турбін великої потужності з визначенням пошкоджуваності з урахуванням ремонтних відновлюваних змін конструкції парової турбіни в період експлуатації та експериментальних досліджень властивостей металу після 220 тис. годин експлуатації. Наведено розрахункові та експериментальні данні подовженої міцності металу корпусів високого та середнього тиску та залишкові терміни експлуатації парової турбіни К-800-240 енергоблоку № 7, що працювали в різних експлуатаційних умовах.

The enrichment and approach to an estimation of a residual resource of high-temperature elements (cylinders of high and middle pressure) of steam turbines of the big capacity with definition of damages taking into account repair regenerative changes of a design of the steam turbine in operation and experimental researches of features of metal after 220 thousand hours of operation is offered. Are resulted settlement and experimental data of long durability of metal of cylinders of average pressure and residual terms of operation of steam turbines К-800-240 of power units № 7 which worked in different operational conditions.

В настоящее время ресурс большинства энергоблоков ТЭС Украины достиг 180–280 тыс. ч., что превышает расчетный (100 тыс. ч.) и парковый (220 тыс. ч.) ресурс. Кроме того, основной парк оборудования ТЭС (энергоблоки мощностью от 160 МВт до 300 МВт) морально и физически устарел. Незначительным ресурсом обладают энергоблоки ТЭС мощностью 800 МВт и атомные энергоблоки. Таким образом, ресурс большинства энергоблоков требует оценки, а с учетом планируемых ежегодных темпов роста экономики необходимо все потенциальные электрогенерирующие мощности Украины ввести в постоянную эксплуатацию к 2017 году. Развитые страны, несмотря на отсутствие экономических проблем, подобных существующим на Украине, продлевают срок эксплуатации ранее установленного и отработавшего парковый ресурс энергетического оборудования. В США, Англии, Голландии, Польше, России и др. при расчетном ресурсе элементов оборудования ТЭС от 30 до 40 лет их предполагается эксплуатировать до наработки 50–80 лет. Продление срока службы оборудования может составлять до (20–30) % стоимости строительства новой ТЭС, что позволяет считать продление эксплуатации экономически выгодным.

Оценка остаточного ресурса энергетического оборудования и продление срока эксплуатации паровых турбин по нормативным документам (НД) [1] включает неразрушающий контроль металла, расчетную оценку ресурса паровых турбин и заключение про возможность дальнейшей эксплуатации оборудования. При расчетной оценке ресурса паровых турбин [2, 3] не учитывались конструктивные изменения в

элементах энергетического оборудования, которые образовались на протяжении всего срока эксплуатации (выборки металла в местах появления трещин и растрескиваний, проточки роторов по канавкам уплотнений и др.). Такие конструктивные меры вызывают ремонтно-восстановительные изменения конструкции корпусов ЦВД и ЦСД. Не в полном объеме учитываются экспериментальные характеристики металла корпусов ЦВД и ЦСД, отработавших свой парковый ресурс, либо в связи с ограниченностью экспериментальных данных по сталям с большими сроками наработок в реальных условиях эксплуатации, либо в связи с отсутствием таких данных.

В работе предлагается комплексный подход к определению остаточного ресурса паровой турбины большой мощности и продлению срока их эксплуатации [4]. Современное развитие вычислительной техники позволяет существенно уточнить расчетные модели литых элементов паровых турбин, таких как корпуса и клапана, путем создания в редакторах (*AVTOSCAD*, *Solid works* и др.) трехмерных моделей энергетических объектов [5].

На первом этапе поверочного расчета разработана методика создания пространственных конструкций элементов турбомашин с применением программного продукта *Solidworks* для корпусов ЦВД, ЦСД с учетом технологических выборок материала элементов оборудования, которые образовались при механической обработке трещин, растрескиваний и промоин на поверхностях корпусов. Технологические выборки материала элементов оборудования получены из экспериментальных данных визуального контроля и магнитопорошковой диагностики (данные эксплуатирующих организаций и лабораторий металла ТЭС). В расчетных моделях ЦВД смоделированы продольные выборки размером 120×85×25 мм и 100×70×20 мм для нижней половины ЦВД (заключение № 311-08 Славянской ТЭС). В расчетных моделях ЦСД смоделированы продольные выборки размером 110×40×25 мм и 90×35×22 мм для нижней половины ЦСД (заключение № 315-08 Славянской ТЭС).

Изменения проектной конструкции основных высокотемпературных элементов паровой турбины на реальную конструкцию соответствующую ремонтно-восстановительным работам, которые возникли за период эксплуатации 190–270 тыс. ч., вызовет и определенные изменения теплового, напряженно-деформированного состояния высокотемпературных элементов паровой турбины и будет влиять на общий срок эксплуатации. При этом такое влияние будет не всегда направлено в сторону ухудшения индивидуального ресурса. Так, например, проточка канавок роторов с целью устранения трещин с увеличением размеров канавок вызывает уменьшение уровня напряжений и продление ресурса оборудования.

На втором этапе поверочного расчета разработан способ решения с помощью цифровых моделей *ANSYS* и *COSMOSWorks* краевой задачи нестационарной теплопроводности с заданием граничных условий (ГУ) теплообмена на поверхностях корпусов ЦВД и ЦСД на базе созданных геометрических 3D моделей. ГУ отвечали эксплуатационным режимам по типу пусков из холодного состояния (ХС), горячего (ГС) и неостывших состояний (НС), стационарного режима. Учитывались схемы утечек пара в уплотнениях, реальные графики пуска при пусках из различных тепловых состояний, заброс конденсата в проточную часть паровой турбины, обогрев фланцев горизонтального разъема. Проведен расчет теплового (ТС) и напряженно-деформированного состояния (НДС) корпусов ЦВД и ЦСД турбины К-800-240 ст. № 7.

Для ЦВД в характерных сечениях (рис. 1а) максимальный градиент температур при пуске из ХС (рис. 1б) имеет место в моменты набора нагрузки 40 МВт (6640 с), в момент нагружения до номинальной нагрузки 800 МВт (32400 с).

ТС наружной поверхности нижней половины ЦВД определяется температурами металла порядка 500 °С в зоне паровпуска и 225 °С в выхлопном патрубке (рис. 2а). Максимальная величина интенсивности условных упругих напряжений от совместного действия разности температуры и действия давления пара в ЦВД отмечена в зоне передних концевых уплотнений  $\sigma_{i\max} = 512,0$  МПа и в зоне паровпуска  $\sigma_{i\max} = 170,0$  МПа (рис. 2б).

Необходимо отметить наличие зон повышенных интенсивностей условных упругих напряжений в местах конструктивного соединения патрубков подвода и отвода пара с собственно корпусом ЦВД. Интенсивности условных упругих напряжения в этих точках достигают  $\sigma_{i\max} = 469,4$  МПа в конце пуска при выходе на номинальную нагрузку (32400 с). Высок общий уровень интенсивностей условных упругих напряжений в зоне канавок под гребни обойм диафрагм передних концевых уплотнений  $\sigma_{i\max} = 420\text{--}460$  МПа (рис. 3б).

При пусках из холодного состояния ХС максимальный градиент температур возникает в ЦСД в характерном сечении 4 (рис. 4а) в момент выдержки на 360 МВт (25960 с) (рис. 4б).

Температура в зоне внутренней поверхности паровпуска не превышает 500 °С (рис. 5а), а на наружной поверхности нижней части ЦСД не превышает 250 °С (рис. 6а). Максимальное значение интенсивностей условных упругих напряжений  $\sigma_{i\max} = 392,0$  МПа корпуса ЦСД находится на внутренней поверхности корпуса в зоне паровпускной части при пусках из ХС в момент времени 25960 с (рис. 5б).

Также значителен общий уровень интенсивностей условных упругих напряжений в зоне пазов крепления диафрагм  $\sigma_{i\max} = 364\text{--}425$  МПа и в зоне фланца со стороны наружной поверхности нижней части ЦСД  $\sigma_{i\max} = 586,8$  МПа (рис. 6б).

Данные теплового и напряженно-деформированного состояния корпусов ЦВД и ЦСД при пусках из характерных тепловых состояний по типу ГС, НС-1 и ХС с учетом ремонтно-восстановительных мероприятий согласно данных обследования СЕ «Донбассэнергоналадка» и лаборатории металлов СЕ «Славянская ТЭС» позволяют провести расчеты малоциклового усталости металла корпусов.

Анализ эксплуатационных повреждений корпусных деталей турбин типа К-800-240 и расчетные исследования напряженно-деформированного состояния показали, что повреждаемости подвержены цилиндры высокого и среднего давления (ЦВД и ЦСД). В ЦВД самой повреждаемой зоной является внутренняя поверхность паровпуска, зона передних концевых уплотнений и зона 8–9 ступеней давления. В корпусе ЦСД наиболее высокие напряжения возникают в нижней части корпуса в зоне паровпуска, в зоне крепления диафрагм 4-й и 5-й ступеней давления и в зоне патрубка отбора пара.

На основании действующих силовых нагрузок от внутреннего давления и теплового состояния металла корпусов ЦВД и ЦСД турбины по максимальным и минимальным значениям интенсивностей условно-упругих напряжений для рассмотренных режимов турбоустановки выполнен поверочный расчет корпусов на малоцикловую усталость.

Результаты расчетной оценки малоциклового усталостной прочности металла ЦВД с учетом повреждаемости корпусов путем организации выборок металла в местах образования трещин представлены в табл. 1. Размеры и глубины выборок принимались согласно данным последнего визуального контроля металла литых корпусных деталей турбины К-800-240 блока ст. № 7 (заключение № 311-08 Славянской ТЭС).

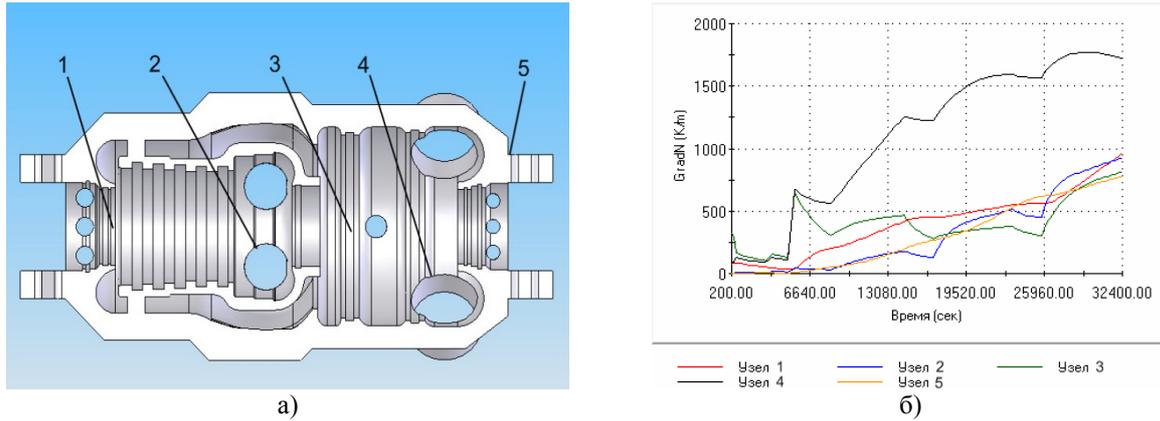


Рис. 1. Характерные сечения максимальных градиентов температур (а) и градиенты температур в характерных сечениях (б) для ЦВД турбины К-800-240

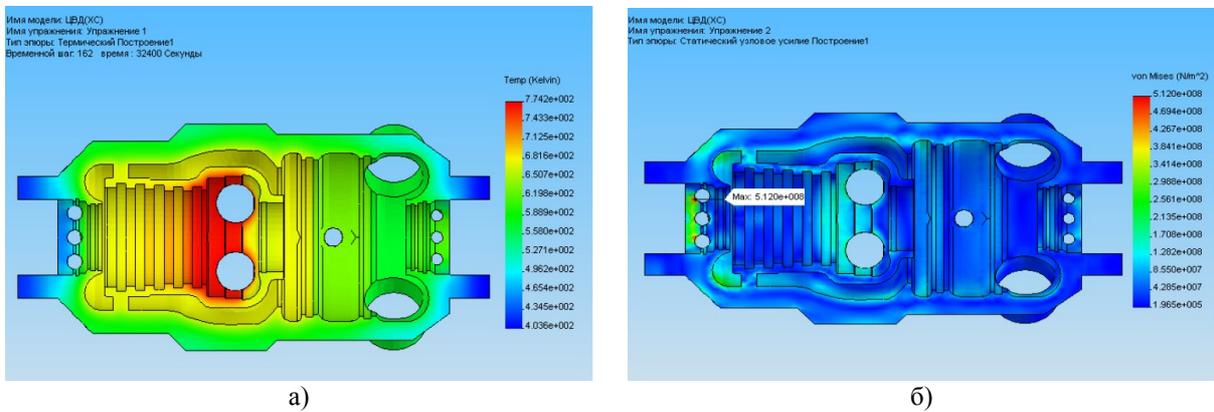


Рис. 2. ТС (а) и НДС (б) внутренней поверхности нижней половины для корпуса ЦВД (К-800-240) при пуске из ХС при выходе на номинальный режим (32400 с)

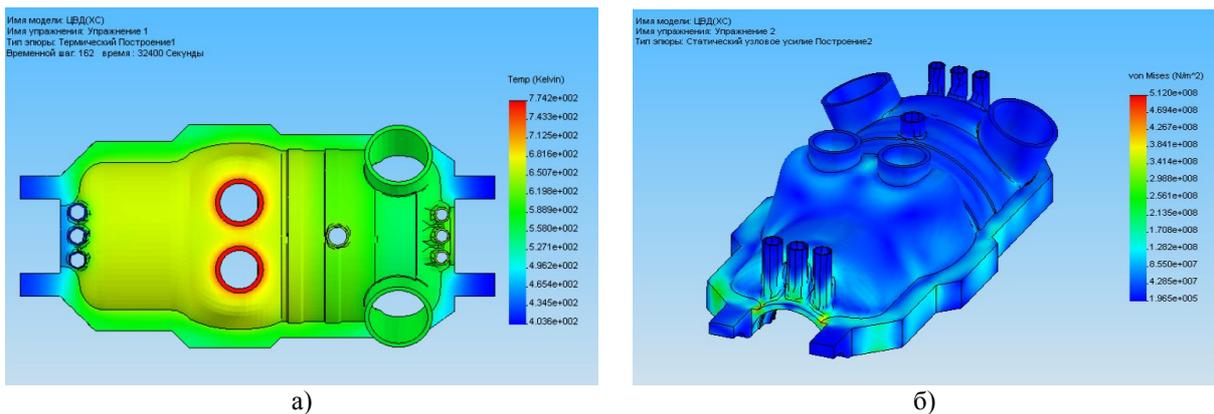


Рис. 3. ТС (а) и НДС (б) наружной поверхности нижней половины для корпуса ЦВД (К-800-240) при пуске из ХС при выходе на номинальный режим (32400 с)

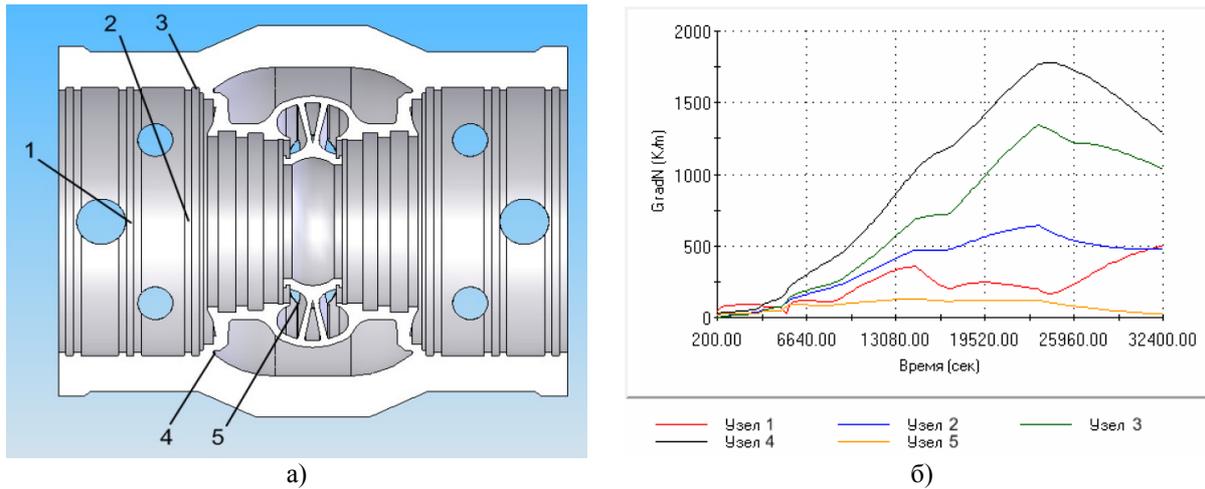


Рис. 4. Характерные сечения максимальных градиентов температур (а) и градиенты температур в характерных сечениях (б) для ЦСД турбины К-800-240

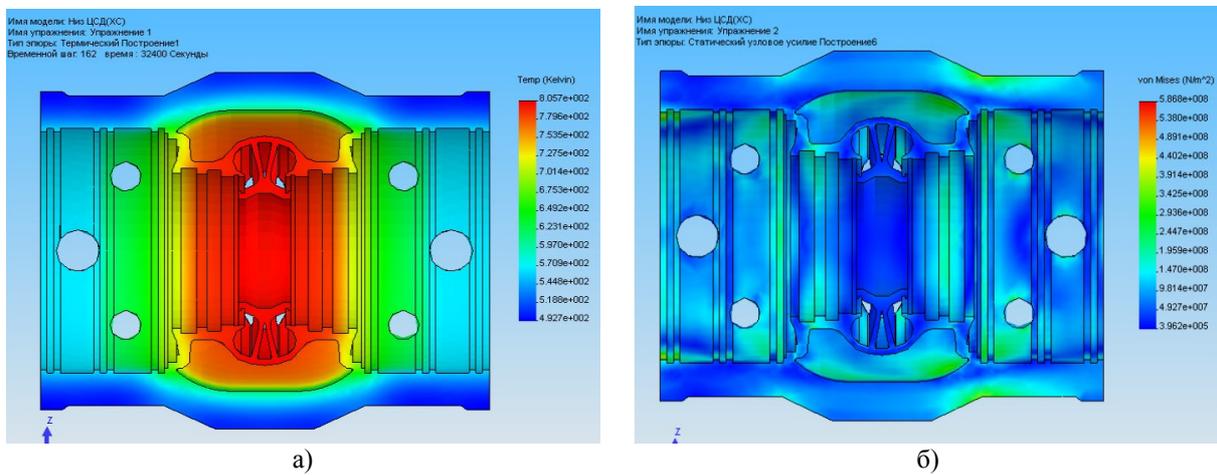


Рис. 5. ТС (а) и НДС (б) внутренней поверхности нижней половины для корпуса ЦСД (К-800-240) при пуске из ХС при выходе на номинальный режим (25960 с)

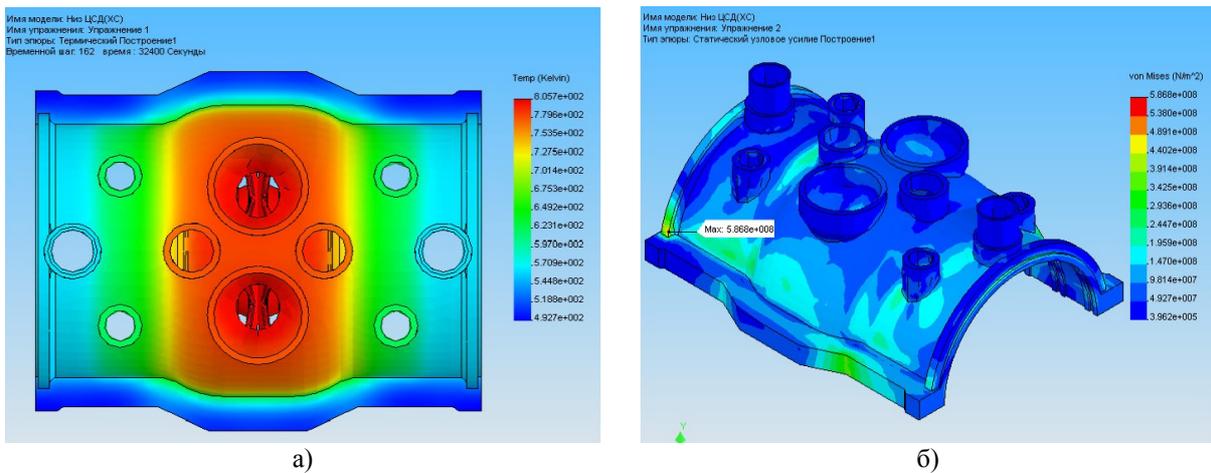


Рис. 6. ТС (а) и НДС (б) наружной поверхности нижней половины для корпуса ЦСД (К-800-240) при пуске из ХС при выходе на номинальный режим (25960 с)

Результаты расчетов на малоцикловую усталость металла корпуса ЦСД при пусковых режимах по типу ГС, НС-1 и ХС с учетом повреждаемости корпусов путем организации выборок металла в местах образования трещин представлены в табл. 2.

Для Славянской ТЭС количество пусков блоков из различных тепловых состояний распределялось так: пусков из ГС было 125 (30,30 %), из НС-1 было 250 (60,60 %) и 38 (9,09 %) из холодного состояния. По данным Славянской ТЭС по состоянию на сентябрь 2008 г. наработка блока ст. № 7 составила 239934 часа и 413 пусков из различных тепловых состояний.

Таблица 1  
Расчетная оценка малоцикловой усталости металла корпуса ЦВД турбины

| ЦВД  | Температура по толщине стенки корпуса, $t_{max}$ , °С | Интенсивность напряжений, $\sigma_i$ , МПа | Приведенная деформация, $\epsilon_{a пр}$ , % | Допускаемое число пусков, $N_d$      |                                       |
|------|---|--|---|--------------------------------------|---------------------------------------|
|      |   |  |   | $n_{ц} = 5,$<br>$n_{\epsilon} = 1,5$ | $n_{ц} = 3,$<br>$n_{\epsilon} = 1,25$ |
| ГС   | 400   | 565,0                                      | 0,1530  | 6000                                 | –                                     |
| НС-1 | 400   | 235,0                                      | 0,1310  | 10000                                | –                                     |
| ХС   | 400   | 608,0                                      | 0,1633  | 6500                                 | –                                     |

Таблица 2  
Расчетная оценка малоцикловой усталости металла корпуса ЦСД турбины

| ЦСД  | Температура по толщине стенки корпуса, $t_{max}$ , °С | Интенсивность напряжений, $\sigma_i$ , МПа | Приведенная деформация, $\epsilon_{a пр}$ , % | Допускаемое число пусков, $N_d$      |                                       |
|------|---|--|---|--------------------------------------|---------------------------------------|
|      |   |  |   | $n_{ц} = 5,$<br>$n_{\epsilon} = 1,5$ | $n_{ц} = 3,$<br>$n_{\epsilon} = 1,25$ |
| ГС   | 534   | 263,0                                      | 0,0818  | 22000                                | –                                     |
| НС-1 | 480   | 307,0                                      | 0,0933  | 16500                                | –                                     |
| ХС   | 428   | 432,0                                      | 0,1230  | 10000                                | –                                     |

С учетом данных по ТС, НДС ЦВД и ЦСД, а также оценки малоцикловой усталости металла ЦВД, ЦСД паровой турбины К-800-240 (табл. 1 и 2) расчетная оценка поврежденности, остаточной допускаемой наработки в годах и индивидуального остаточного ресурса корпусов ЦВД и ЦСД для энергоблока ст. № 7 Славянской ТЭС представлена в таблице 3.

При определении остаточного ресурса корпусов оценка кратковременной статической прочности может выполняться по максимальному значению номинального эквивалентного напряжения  $\sigma$ , [3]). Коэффициент запаса по пределу текучести материала цельнокованых роторов  $\sigma_{02}^B$  при расчетной температуре  $t$  на стационарном режиме должен удовлетворять условию  $n_r' \geq 1,5$  и  $n_r'' \geq 1,5$ .

Выбор коэффициентов запаса есть оптимизационная задача для различных расчетов [6]. Так же в запас идет выбор расчетной температуры в точке металла, равной температуре металла на номинальном режиме, при определении малоцикловой усталости энергетического оборудования. Если из соображений оптимизации запасов прочности по числу циклов и по величине приведенных деформаций провести исследования состояния металла и снизить коэффициенты запаса прочности, то допускаемое число пусков можно повысить.

Оценка кратковременной статической прочности корпусов ЦВД и ЦСД выполняется согласно рекомендациям [3]. Запасы кратковременной статической прочности корпусов ЦВД и ЦСД нигде не выходят за пределы допустимых ( $n_t' \geq 1,5$ ), что позволяет дальнейшую эксплуатацию.

Таким образом, расчетная поврежденность металла корпуса ЦВД турбоагрегата К-800-240 ст. № 7 Славянской ТЭС составляет 6,8 %, а корпуса ЦСД – 4,13 %. Допустимое дополнительное расчетное число пусков для корпуса ЦСД не ограничено. Для корпуса ЦВД допустимое дополнительное расчетное число пусков не ограничено при наиболее жестком режиме пусков с максимальной амплитудой деформаций в рассматриваемой зоне согласно рекомендациям [3].

Таблица 3

Расчетная оценка поврежденности, остаточной наработки в годах  
и индивидуального ресурса корпусов ЦВД и ЦСД энергоблока ст. № 7 Славянской ТЭС

| № п/п | Наименование  | ЦВД      | ЦСД     |       |
|-------|---|----------|---------|-------|
| 1     | Температура металла                                   | 520      | 515     |       |
| 2     | Интенсивность напряжений                              | 91,94    | 90,5    |       |
| 3     | Предел текучести                                      | 210,0    | 210,0   |       |
| 4     | Номинальное эквивалентное напряжение                  | 96,45    | 94,5    |       |
| 5     | Запас прочности $\sigma_{i\max}$                      | 2,28     | 2,308   |       |
| 6     | Запас прочности по $\sigma_s$                         | 2,18     | 2,235   |       |
| 7     | Допускаемое число циклов по различным типам пусков    | ГС       | 6000    | 22000 |
|       |   | НС-1     | 10000   | 16500 |
|       |   | ХС       | 6500    | 10000 |
| 8     | Циклическая поврежденность                            | 0,05     | 0,02463 |       |
| 9     | Наработка, час  | 239934   | 239934  |       |
| 10    | Число часов работы в год                              | 6485,0   | 6485,0  |       |
| 11    | Годовая циклическая поврежденность                    | 0,001315 | 0,00066 |       |
| 12    | Остаточная наработка в годах с учетом запаса $n_n''$  | 114,0    | 265     |       |
| 13    | Индивидуальный остаточный ресурс                      | 739290   | 1719504 |       |
| 14    | Общее число пусков                                    | 413      | 413     |       |
| 15    | Циклическая поврежденность (упрощенная формула)       | 0,068    | 0,0413  |       |
| 16    | Суммарная поврежденность за год (упрощенная формула)  | 0,001789 | 0,00186 |       |
| 17    | Остаточная наработка в годах с учетом запаса $n_n''$  | 73,78    | 84,94   |       |
| 18    | Индивидуальный остаточный ресурс (упрощенная формула) | 478489   | 550874  |       |
| 19    | Остаточный ресурс, час                                | 478489   | 550874  |       |

Индивидуальный остаточный ресурс ЦВД и ЦСД составляет 478489 и 550874 часов при запасе поврежденности на прогнозируемый период  $n_n'' = 5$ . Согласно рекомендациям [3] при накоплении опыта по поврежденности корпусов запас поврежденности на прогнозируемый период можно уточнить. Это позволит продлить эксплуатацию корпусов ЦВД и ЦСД на 50000 часов при числе пусков до 350.

**Выводы:**

1) Использован комплексный подход к оценке остаточного ресурса паровых турбин большой мощности и продления срока их эксплуатации сверх паркового ресурса. Выделены основные этапы исследований, на основе которых экспертная комиссия принимает решение о продлении эксплуатации паровых турбин большой мощности. Особое внимание надо уделить этапу экспериментального исследования по влиянию старения металла высокотемпературных элементов паровой турбины в процессе длительной эксплуатации [4].

2) Расчетная степень выработки ресурса металла корпуса ЦВД за прошедший срок эксплуатации турбины ст. № 7 составляет 6,8 %, а расчетная степень выработки ресурса металла корпуса ЦСД составляет 4,13 %. Допустимое дополнительное расчетное число пусков для корпуса ЦВД и ЦСД не ограничено. Индивидуальный остаточный ресурс ЦВД и ЦСД составляет более 50000 часов при запасе поврежденности на прогнозируемый период  $n_n'' = 5$ , что позволяет продлить эксплуатацию корпусов ЦВД и ЦСД на 50000 часов при числе пусков, равном половине паркового количества, т.е. 400 пусков.

3) Продление эксплуатации паровых турбин большой мощности сверх паркового ресурса возможно на основе внедрения комплекса мероприятий по модернизации системы контроля основных параметров турбоустановки, мониторингу и диагностике роторов турбоагрегатов, мониторингу теплового и напряженно-деформированного состояния высокотемпературных элементов турбомашин в процессе эксплуатации. Также необходима оптимизация пусковых режимов, совершенствование схемных решений, предварительный прогрев роторов и другие мероприятия. Внедрение автоматизированных систем технической диагностики (АСТД) и управления ресурсом энергоблоков позволит обеспечить надежную работу оборудования сверх паркового ресурса.

**Список литературы:** 1. НД МПЕ України. Контроль металу і продовження терміну експлуатації основних елементів котлів, турбін і трубопроводів теплових електростанцій. – Типова інструкція. СОУ-Н МПЕ 40.17.401:2004. 2. РТМ 108.021.103. Детали паровых стационарных турбин. Расчет на малоцикловую усталость. – М., 1985, № АЗ-002/7382. – 49 с. 3. РД 34.17.440-96. Методические указания о порядке проведения работ при оценке индивидуального ресурса паровых турбин и продлении срока их эксплуатации сверх паркового ресурса. – М., 1996. 4. Черноусенко, О.Ю. Комплексный подход оценки остаточного ресурса высокотемпературных элементов паровых турбин, отработавших парковый ресурс [Текст] / О.Ю. Черноусенко // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. науч. трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2010. – № 2. – С. 59-64. – ISSN 2078-774X. 5. Письменный, Е.Н. Расчетное определение малоциклового усталости высокотемпературных элементов паровой турбины мощностью 200 МВт с применением программного комплекса ANSYS И COSMOSWorks [Текст] / Е.Н. Письменный, О.Ю. Черноусенко [и др.] // Вестник НТУУ «КПИ». Машиностроение. – К.: НТУУ «КПИ», 2008. – С. 188-195. 6. Трухний, А.Д. Новый подход к оценке малоциклового долговечности деталей энергетического оборудования [Текст] / А.Д. Трухний // Теплоэнергетика. – 1994. – №4. – С. 2-6.

© Черноусенко О.Ю., 2012  
Поступила в редколлегию 15.02.12